第41卷　第12期
2024年12月
干 旱 区 研 究
ARID　ZONE　RESEARCH
Vol. 41　No. 12
Dec. 2024

风沙区涵洞翼墙类型对风沙流输移影响的数值模拟

夏　天[1,2,3]，　李生宇[1,2,3]，　张　璟[1,2,4,5]，　崔珂军[1,2,3]

（1. 中国科学院新疆生态与地理研究所干旱区生态安全与可持续发展重点实验室，国家荒漠-绿洲生态建设工程技术研究中心，新疆 乌鲁木齐　830011；2. 中国科学院大学，北京　100049；3. 中国科学院新疆生态与地理研究所莫索湾沙漠研究站，新疆 石河子　832000；4. 新疆交通科学研究院有限责任公司，新疆 乌鲁木齐　830000；5. 干旱荒漠区公路工程技术交通运输行业重点实验室，新疆 乌鲁木齐　830000）

摘　要：涵洞是主要用来排泄路堤下水流的构造物，而风沙地区道路涵洞普遍面临积沙问题，影响行洪并威胁道路安全，而涵洞口翼墙是影响涵洞积沙的重要因素。为了甄选出可减少涵洞积沙的翼墙类型，构建了一字墙（A）、八字墙（B）、直式墙（C）等三种典型翼墙涵洞模型，对涵洞内外流场特征及积沙过程进行数值模拟。结果表明：（1）涵洞内流场结构及流速因翼墙类型而明显变化，A、B洞内气流主要贴附于涵洞上壁面移动，C洞内气流处于加速状态，洞内整体流速C>B>A。（2）涵洞积沙过程因翼墙类型而明显变化，因A、B的导汇流作用，洞内风沙流浓度较高，易发生积沙，C导流能力弱，在涵洞口及路肩容易积沙；随着来流风速增大，三种涵洞的输沙能力均得到提升，C提升最明显，B其次，A最小。（3）风向对涵洞积沙也有影响，随着斜交角度增大，A、C洞内积沙程度加重而B洞内积沙程度减轻。（4）不同翼墙对风沙流的输移效率不同，洞内积沙程度A>B>C，输沙效率则C>B>A。总体来说，翼墙C有利于减轻涵洞积沙。

关键词：道路涵洞；流场分布；风沙流；数值模拟

中国是世界上受风沙灾害影响最为严重的国家之一，全国沙化土地主要集中在西北干旱、半干旱地区[1]。沙源丰富，风沙活动剧烈，风沙灾害多发，严峻的风沙灾害严重制约了这些地区生态经济和社会发展，不仅加重了当地的土地沙漠化程度并且对已有的公共基础设施，农村农田及交通干线产生了严重的破坏[2-4]。受复杂的风蚀地貌和严峻的风沙环境影响，道路交通运输成为了西部风沙区主要的交通运输方式[5]，是区域生产建设的重要基础设施，对推进"一带一路"倡议和国际合作交流发挥着重要作用。为了道路沙害防治，学者就路基风沙流结构[6-7]、路基边坡输沙参数优化[8-10]、道路护栏类型改进[11-12]、附属防沙措施优化等[13-14]方面开展了大量研究。

涵洞是地面水流横穿道路的小型排水构造物，为道路设施的一部分，兼有人或动物穿越通道的功能，在道路工程中占有较大比重[15]。风沙地区道路涵洞也受到较严重的风沙危害，其中涵洞积沙最为普遍[16]，洞内积沙可导致涵洞堵塞，降低过水行洪能力，从而危及道路安全，治理难度大。为此相关学者对涵洞流场及风沙流响应规律进行了一定研究，李凯崇等[17]对涵洞及周围流场进行了数值模拟和实地测量，发现涵洞入口处风速要大于两侧导流堤风速，沙粒容易沿导流堤侧移进入涵洞内，随着洞内风速减弱而沉积。石龙等[18]对涵洞风沙流进行了数值模拟，结果表明涵洞出口处先发生积沙，随后积沙向洞内延伸。智凌岩等[19]采用沙床模型模拟了不同风向涵洞积沙情况，得出涵洞积沙与风向有关。崔晓宁[20]对涵洞数值模拟发现，斜交风是导致涵洞积沙的主要原因。杨晓明等[21]模拟了不同高度涵洞对来流风速的响应，发现涵洞越高对气流的阻滞作用越小。但以上研究均采用单一的翼

收稿日期：2024-06-25；　**修订日期：**2024-10-05
基金项目：塔里木盆地风沙灾害调查与风险评估（E1160202）；面向工程实践的新疆高速公路沙害防治技术方案与应用示范（XJJTZKX-FWCG-202401-0043）
作者简介：夏天（2000-），男，硕士研究生，主要从事风沙灾害防治. E-mail: toexv@foxmail.com
通讯作者：李生宇. E-mail: lishy_hb@163.com

墙类型,忽略了翼墙类型对来流风沙输移的影响。翼墙位于涵洞洞口与导流堤之间,对洞口气流具有重要的导流和阻挡作用,翼墙的变化容易引起风沙流输送方式改变从而对道路及涵洞内部风沙流的积蚀规律产生一定影响。为探明不同翼墙对涵洞流场及风沙流的响应规律,本文基于风沙两相流理论原理,对一字墙、八字墙、直式墙等三种典型涵洞翼墙类型进行数值模拟研究(图1),通过对比三种翼墙类型的流场特征及积沙情况进行分析,以期为风沙地区道路涵洞积沙防治提供参考。

1　数值模拟

1.1　理论基础

风沙流是沙粒在气体的作用下的运动现象,属于典型的气一固两相流[22]。本文采用欧拉双流体模型模拟风沙流,将固相及气相视为连续介质,用体积分数来表示各相,能计算较大体积分数的气固流动,遵循基本控制方程。

气相质量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_a\rho_a)+\nabla(\alpha_a\rho_a\vec{v}_a)=0 \tag{1}$$

沙相质量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s\rho_s)+\nabla(\alpha_s\rho_s\vec{v}_s)=0 \tag{2}$$

两相体积分数之和:

$$\alpha_a+\alpha_s=1 \tag{3}$$

气相动量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_a\rho_a\vec{v}_a)+\nabla(\alpha_a\rho_a\vec{v}_a\vec{v}_a)=-\alpha_a\nabla p+\nabla\bar{\bar{\tau}}_a+\alpha_a\rho_a\vec{g}+K_{as}(\vec{v}_a-\vec{v}_s)+f_{sg} \tag{4}$$

沙相动量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s\rho_s\vec{v}_s)+\nabla(\alpha_s\rho_s\vec{v}_s\vec{v}_s)=-\alpha_s\nabla p-\nabla p_s+\nabla\bar{\bar{\tau}}_s+\alpha_s\rho_s\vec{g}+K_{sa}(\vec{v}_s-\vec{v}_a)+f_{sg} \tag{5}$$

相互作用力:

$$f_{sg}=\frac{3C_D\alpha_s\alpha_s\rho_g}{4d}|v_r|v_r\alpha_g^{-2.65} \tag{6}$$

式中:t 表示时间;α_a、α_s 表示空气相和沙粒相所占的体积分数;$\vec{v}_a$、$\vec{v}_s$ 表示空气相和沙粒相的速度矢量;ρ_a、ρ_s 表示空气相和沙粒相的密度,其中空气相取1.225 kg·m^{-3},沙相取2600 kg·m^{-3};p 表示气相和固相的共享压力;K_{as}、K_{sa} 分别表示空气相和沙粒相之间的动量交换系数;$\bar{\bar{\tau}}_a$、$\bar{\bar{\tau}}_s$ 为气、固相对应的剪切应力;$\vec{g}$ 表示重力加速度,取值为−9.81 m·s^{-2};f_{sg} 为气、固相互作用力;p_s 为沙相固体压力;C_D 为曳力系数;d 为沙粒当量直径,取值为0.1 mm;v_r 为气沙两相的相对速度。

计算域中不规则的计算模型使流动过程中流场会产生复杂涡流。本文模拟采用的湍流模型为标准的 k-ε 模型,是建立在RANS下的两方程模型,由求解湍流动能 k 及湍流耗散 ε 构成,考虑湍流完全发展的情况下,适用于本工程中的流体计算,控制方程如下:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\right]+G_K+G_b-\rho\varepsilon-Y_M+S_K \tag{7}$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho\varepsilon u_i)}{\partial x_j}=\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j}\right]+C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_K+C_{3\varepsilon}G_b)-C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k}+S_\varepsilon \tag{8}$$

$$\mu_t=\rho C_\mu\frac{k^2}{\varepsilon} \tag{9}$$

式中:G_K 表示由速度梯度引起的湍流动能;G_b 表示



图1　新疆沙漠高速公路典型翼墙涵洞的积沙

Fig. 1　Sand accumulation in typical wing wall culvert of Xinjiang desert expressway

由浮力引起的湍流动能；Y_M 为可压缩性湍流脉动修正项；S_K 、S_ε 为K方程和 ε 方程的源项；$C_{1\varepsilon}$ 、$C_{2\varepsilon}$ 为常数，$C_{1\varepsilon}$ 取值1.44，$C_{2\varepsilon}$ 取值1.92；$C_{3\varepsilon}$ 为浮力相关系数；σ_k 、σ_ε 分别为湍流动能和湍流耗散率所对应的普朗特数；μ_t 为湍流黏性系数；C_μ 为经验系数，一般取值为0.09。

1.2 计算域构建及网格划分

对实地考察的典型公路涵洞结构进行合理简化，构建三维涵洞模型。路基尺寸依据高速公路双向四车道设计，涵洞洞口为矩形，尺寸为4 m×2 m，路基边坡比为1:3，高度为3 m，道路宽24 m。为保证流场充分发展，计算域上边界高度至少为5 H，离入口距离至少10 H，离出口距离至少20 H，H为模型高度[23]。最终计算域尺寸为142 m×30 m×30 m，分别构建了一字墙（A）、八字墙（B）、直式墙（C）三种常见的涵洞翼墙结构模型（图2）。由于模型较为复杂，为节约计算资源，计算网格采用六面体核心网格。首先在计算域表面生成面网格，并据此生成Poly-Hexcore非结构化网格。本次模拟主要关注涵洞及路堤周围区域，同时也是流速梯度变化最大区域，因此，对道路、路基边坡及涵洞部分进行加密。指定第一层网格高度为y+满足15~30<y+<100~400，在壁面进行边界层网格划分，划分层数为3层。以A模型为例，最终总体网格尺寸控制在0.8 m，局部尺寸为0.2 m，网格增长率为1:1.1，网格数量为1.56×10^6，网格质量良好，满足计算要求。

1.3 参数条件设置

本文模拟采用瞬态模拟。根据空气动力学原理，当马赫数<0.3时，空气视为不可压缩流。本数值模拟将风沙流速度设置<0.3马赫，定义计算域左侧入口边界为速度入口（Velocity-inlet），出口边界条件为自由出口（Outflow），两侧及顶部边界条件为对称面(Symmetry)，下壁面及道路涵洞表面边界条件为无滑移壁面（Wall），并将入口风速进行UDF编译为对数风速轮廓线：

$$u(y)=\frac{u_*}{k}\ln\frac{y}{y_0} \tag{10}$$

式中：$u(y)$ 为水平高度下 y 的风速；u_* 为摩阻风速；k 为冯卡门系数，取0.4；y_0 为粗糙度常数，文中取5.44×10^{-6}[24]。

风沙流中沙粒为稀相，故入口沙相体积分数设置为1.5%，动力黏度、碰撞交换系数采用Gidaspow模型，摩擦黏度采用Schaeffer模型，升力系数采用saffman-mei模型，曳力系数采用Syamlal-O'Brien模型，采用Phase Coupled SIMPLE求解器求解，离散相采用QUICK高阶离散格式，以防止数值扩散，提高求解精度[25]，湍流强度为0.05，湍流半径为1 m，残差收敛至1×10^{-5}，以保证求解结果的准确性[26-27]。

1.4 模型验证

为验证数值模拟过程中的参数设定与网格划分，将数值模拟结果与风洞实验结果进行对比。风洞实验在中国科学院新疆生态与地理研究所莫索湾沙漠研究站进行。将涵洞模型(翼墙类型对应本

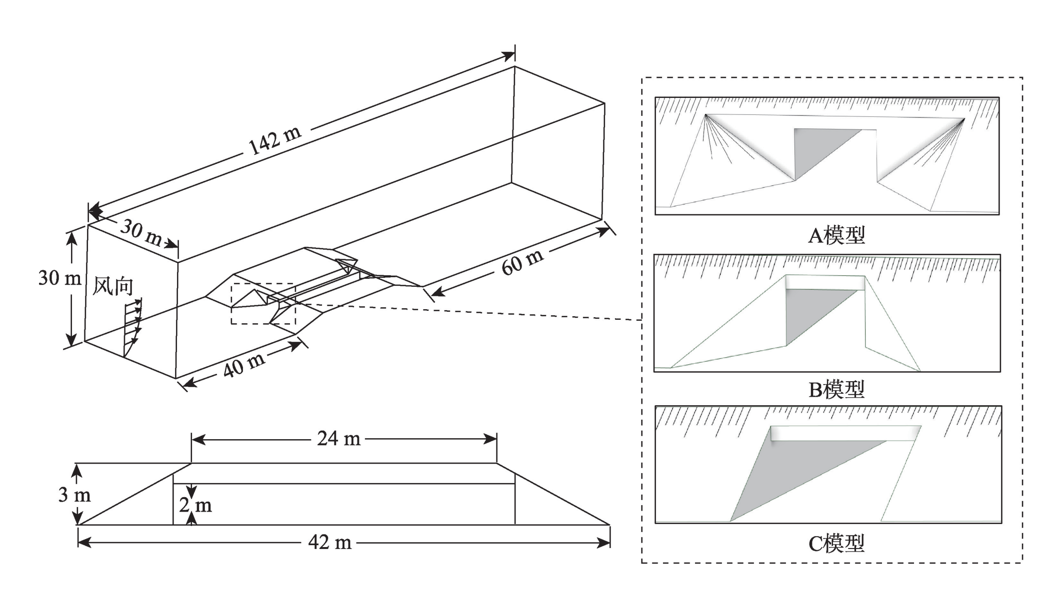


图2 公路涵洞模型及计算域示意图

Fig. 2 Highway culvert model and calculation domain diagram

文模型B)进行1:20的尺寸进行缩放模拟,轴心风速设定为9 m·s^{-1},测量点位于涵洞前后0.55 m处,绘制测点风速廓线与数值模拟进行对比验证(图3)。由图3可知,数值模拟风速廓线与风洞实验结果类似,表明网格划分及模拟参数的设置均在合理范围内,对后续其他涵洞模型的模拟具有一定可靠性。

2　结果与分析

2.1　涵洞内外的流场特征

以10 m高度下12 m·s^{-1}风速为例,模拟了不同翼墙涵洞流场分布(图4),图中速度越大颜色越接近红色,反之则越接近蓝色。由图4可知,三种翼墙涵洞外部的流场结构基本相同,当气流接近翼墙及涵洞洞口时,受墙壁阻碍,底部气流发生明显减速,又因涵洞上台壁阻隔,气流在洞口发生了分离绕流,高速气流向上沿边坡移动形成加速区;在经过路基背风侧时,部分气流继续向前移动,靠近路面气流受上风气流影响向下运动,与涵洞出口气流汇合,并受上方气流影响形成低速扩散区。涵洞入口处低速气流向下沿涵洞上壁面进入涵洞内部,三种翼

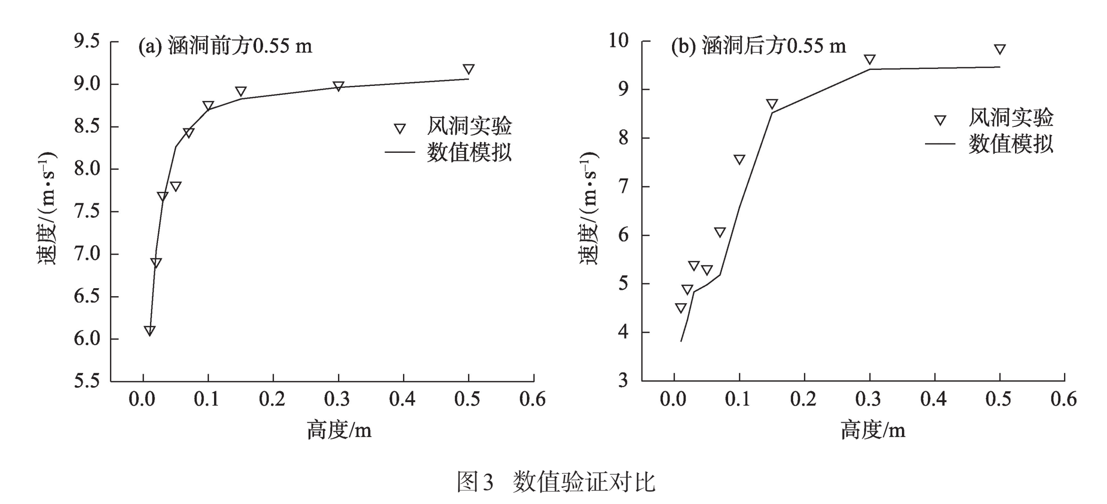


图3　数值验证对比

Fig. 3　Comparison diagram of numerical validation

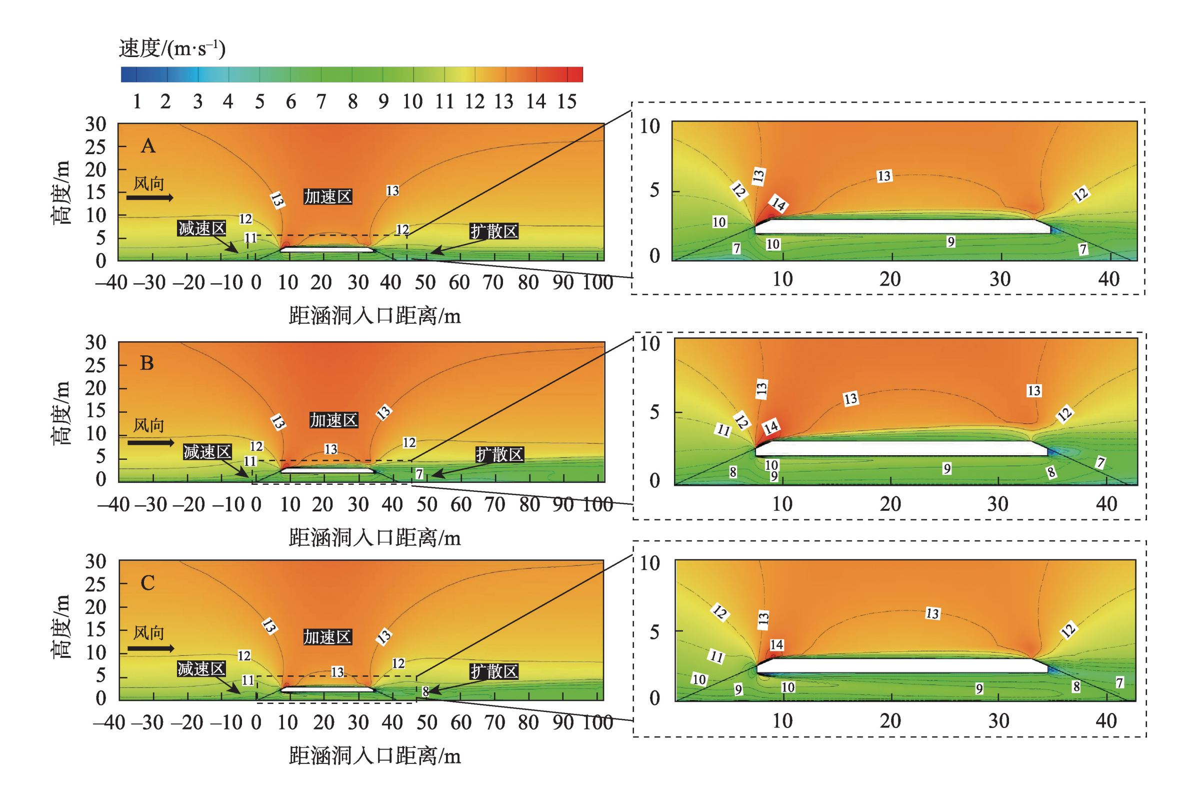


图4　三种翼墙类型涵洞周围流场分布

Fig. 4　Distribution of flow field around three types of wing wall culverts

墙涵洞内部流场产生了明显分异。对于涵洞翼墙A、B模型，涵洞底部气流与洞内气流有明显分层现象，受壁面摩擦力影响，随着深入涵洞流速不断减弱，这与李凯崇等[17]的研究一致。A模型涵洞口向下分离的气流会贴附于洞体上壁面移动，受文丘里效应影响，上壁面高速气流对底部低速气流有一定的吸附效应，导致涵洞后段底部气流流速降低。B模型洞内气流流速加速效应明显，气流流速较高且流速不易衰减，持续至涵洞出口附近。对于涵洞翼墙C模型，涵洞入口处底部气流减弱程度较低，洞内整体气流沿涵洞底部偏移，底部流速增大，而洞内上壁面流速较小。

引入气流波动指数(相同高度下观测点风速与入口风速的比值)来更加直观表征不同翼墙类型对涵洞内外气流的影响。由图5可知，不同翼墙涵洞，其气流波动变化过程及变化幅度有明显差异。为便于研究不同翼墙结构对来流风速的影响，将整个沿程流速变化分为三个阶段。第一阶段为气流受阻变化阶段，这一阶段受到翼墙和路基的影响导致气流波动指数发生衰减，风速开始降低，其中A、B两种模型气流波动指数下降，分别到达0.55、0.62。而C模型气流波动指数在下降至迎风侧坡脚处达到0.72后开始上升，并在洞口前有短暂下降；第二阶段为气流聚集阶段，这一阶段当气流抵达洞口附近时，受“狭管效应”作用，洞口处过流断面减小，气流被压缩导致流速增大，A、B、C三种模型气流波动指数均得到了上升，其中A、B模型气流波动指数达到最大值，分别为0.95、0.91。洞内三种模型气流指数变化不同，A、B模型洞内气流波动指数呈下降趋势，且A模型下降程度要大于B模型。C模型洞内气流受翼墙影响向下偏移，导致其气流波动指数增加；第三阶段为气流扩散阶段。气流经涵洞出口，过流断面增大，气流发生扩散，A、B、C气流波动指数均发生剧烈下降，并于出口一段距离后开始回升。0.1 m和0.5 m高涵洞入口及出口外气流波动指数变化过程基本相同，各测点0.5 m高气流波动指数均大于0.1 m。A、B模型气流波动指数在0.5 m高度下差异增大明显，因此，相对于B模型，A模型翼墙结构对涵洞内部气流扰动更为剧烈，洞内整体流速最低。

以垂直于来流方向，在距离洞体0 m、42 m处沿道路走向截取0.1 m高度下的风速变化值用于表征不同翼墙结构对涵洞进出口风速的影响(图6)。其中a1−b1、a2−b2对应两侧路基宽度，b1−c1、b2−c2对应A、B模型两侧翼墙宽度，c1−c2对应涵洞洞口宽度。由图6 a可知，在涵洞入口截面处三种翼墙结构风速变化成拱形分布，风速沿两侧截面向中轴处逐渐增大并于中轴处达到最大值，导致来流沙粒可能会沿路基翼墙两侧向洞口输移。由于翼墙类型不同，A、B模型翼墙开口角度比C模型要大，能捕捉到较大截面的气流量，因此在入口b1−c1、b2−c2段下风速上升幅度较大，且风速值大于C模型。C模型翼墙角度平行于来流方向，对来流的阻碍作用较低，但难以捕捉到洞口宽度外的气流，仅在c1−c2点处风速开始上升，上升幅度大于A、B模型。A、B、C模型中心点风速均大于5 $m\cdot s^{-1}$的一般起沙风速，有

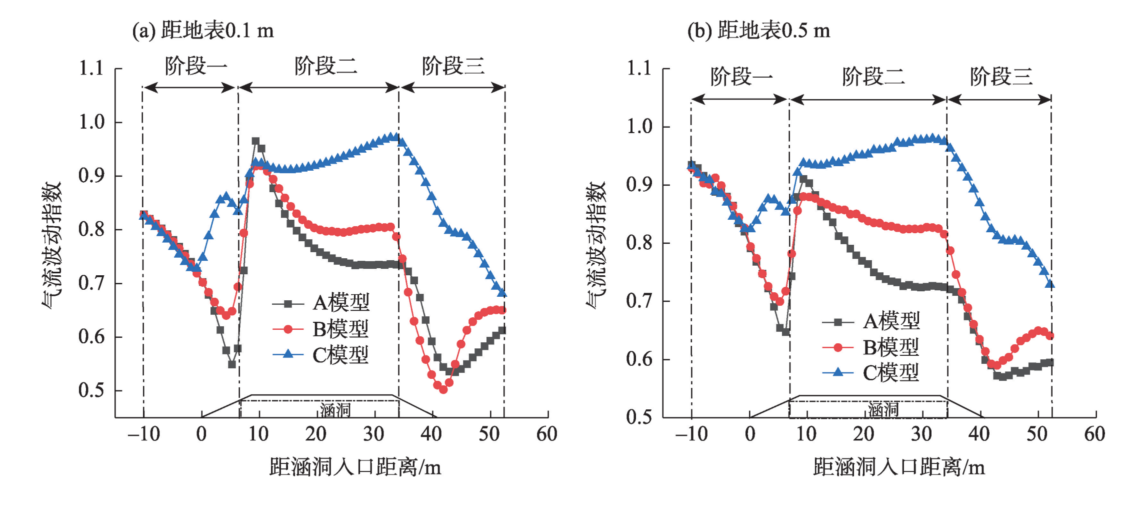


图5 三种翼墙类型涵洞中轴气流波动指数

Fig. 5 Axial flow fluctuation index of three types of wing wall culvert

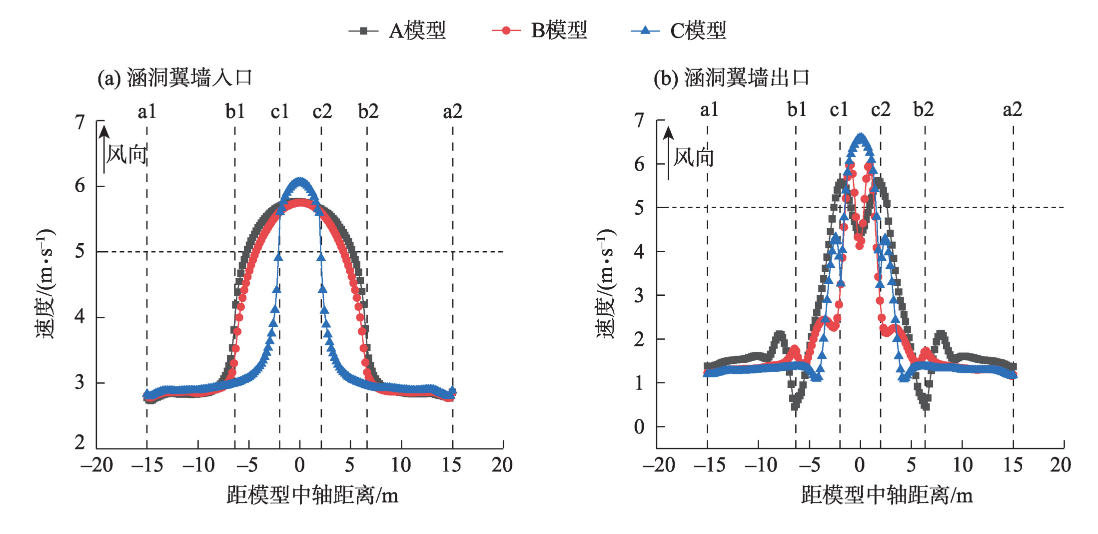


图6 三种翼墙类型涵洞进出口截面风速

Fig. 6 Three types of wing wall culvert inlet and outlet section wind speed

助于洞外沙粒向洞内迁移[28-29]。

对于涵洞出口截面流速变化(图6b)来看,受不同翼墙影响,气流在涵洞出口均表现不一样的特征。A模型在a1–b1、a2–b2段风速先上升后下降,随后在b1-b2段处开始大幅回升,到c1–c2段向中心处发生下降。B模型则流速在b1、b2点处有小幅度下降,随后开始上升,c1–c2段和A模型类似,均向中心处发生下降。C模型则在a1–c1、a2–c2段风速上升幅度较小,于c1–c2段呈直线形快速上升,在中心处达到最大值。总的来说,三种模型涵洞出口中心风速均略低于入口中心速度,其中A、B模型受翼墙导流作用,经过涵洞的气流容易受惯性力影响沿涵洞两侧流动,导致涵洞出口处洞口两侧风速大于中心风速。三种模型中A、B模型出口截面风速整体低于5 m·s^{-1},C模型中心风速则高于该起沙风速,因此,A、B模型涵洞出口处更容易造成沙粒沉积。

2.2 涵洞内外风沙流变化

2.2.1 涵洞内外积沙过程 欧拉双相流能以体积分数来直观反应风沙流搬运能力,体积分数上限为0.63,该分数越高表明该区域越容易造成沙粒堆积[30]。图7为来流风速12 m·s^{-1}模拟时长10 s、20 s时涵洞内外积沙分布图。10 s时,A、B模型沙粒主要被搬运至涵洞出口处及涵洞内部,部分沙粒沉积在A模型进口锥坡处,A模型洞内积沙小于B模型,C模型沙粒

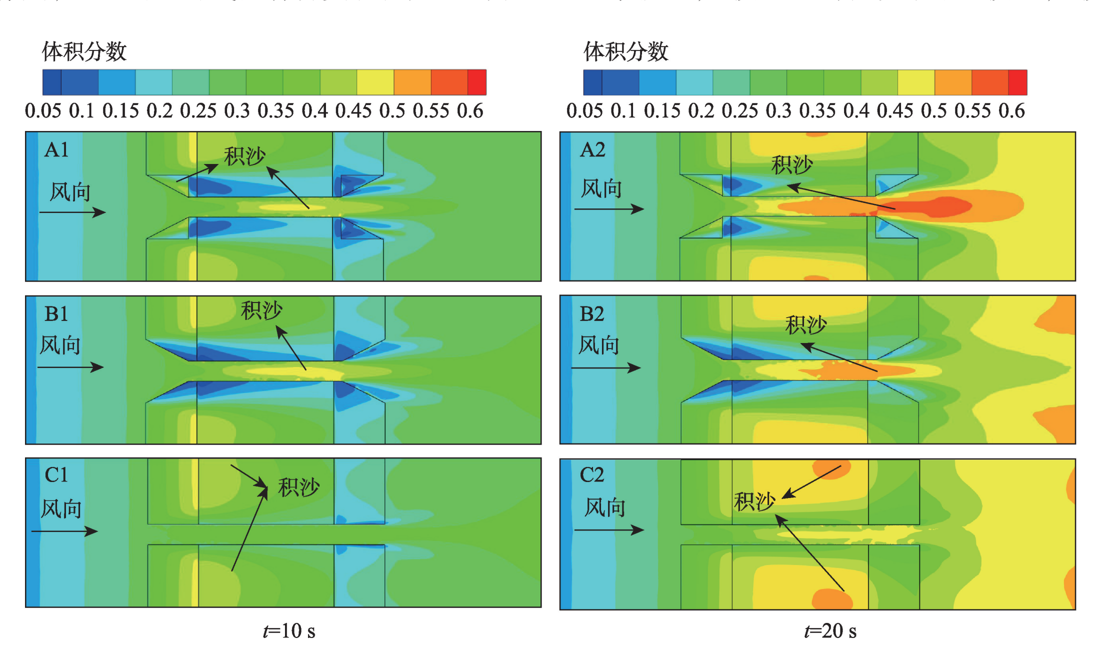


图7 三种翼墙类型涵洞10 s、20 s时积沙分布

Fig. 7 Sediment distribution map of three types of wing wall culverts during 10 s and 20 s

主要沉积在洞口两侧的路基边坡坡脚处,洞内积沙程度较轻。20 s时,A、B模型涵洞出口积沙量显著增大,A模型出口积沙增大幅度大于B模型,路面积沙则较少;C模型洞内积沙变化较小,部分沙粒从迎风侧坡面输送到路面,导致路面积沙程度增大。

整体来看,随着时间推移,三种涵洞入口处积沙变化较小,而洞内和出口处积沙变化幅度大,A、B模型由于出口积沙大幅增加,积沙向洞内逐渐扩展,这与石龙等[18]的研究一致。不同翼墙类型沙粒搬运过程不同。A、B模型因为翼墙对风沙流的导流作用,使得风沙流及路基边坡处的沙粒得以沿着翼墙两侧向洞内移动,并受洞口段内的加速气流带入至涵洞内部,导致洞内风沙流浓度增大,随着涵洞内气流在出口发生扩散,风速受到减弱,使得洞内风沙流浓度过饱和,导致部分沙粒沉积,这些沉积的沙粒再次影响出口风速,就此反复使得积沙堵塞涵洞。C模型因翼墙平行于来流方向,因此,洞口对风沙流的导流作用要低于A、B模型,入口风速受翼墙扰动较低,出口处受气流扩散影响较小,部分沙粒的运输主要沿着坡面向道路路面移动,洞内积沙程度对比A、B模型要低,但路面积沙程度则相对较高。

2.2.2 涵洞积沙随来流风速的变化 图8为9 m·s⁻¹、12 m·s⁻¹及15 m·s⁻¹三种来流风速对三种涵洞模型风沙流数值模拟结果(模拟时间30 s)。由图8可知,当来流风速9 m·s⁻¹时,风沙流受路基边坡影响,部分沙粒不能通过路基迎风侧边坡,而堆积在坡脚,导致涵洞入口处积沙量增加,另一部分沙粒被气流带入涵洞内,但气流搬运能力不足以将沙粒搬运出涵洞,从而沉积在涵洞内部,致使涵洞从入口到出口都形成大量积沙。当来流风速增大至12 m·s⁻¹时,气流基本能挟带沙粒越过路面,大量沙粒沉积在路基背风侧坡脚,涵洞内部积沙也明显变化,从三种涵洞模型积沙分布可以看出,涵洞入口处积沙减少,涵洞内积沙程度有一定缓解,但涵洞中部到出口处仍有较多积沙,其中A模型洞内及尾部积沙程度要明显大于B模型,C模型积沙主要集中在出口及翼墙处且积沙程度最小。当来流风速15 m·s⁻¹时,三种模型涵洞内积沙程度均大幅减轻,A、B模型积沙仅位于涵洞出口处,且A模型积沙程度相对较大且洞内尾部积沙与背风侧积沙相连,B模型涵洞尾部虽有积沙但程度要小于A模型,C模型涵洞出口积沙程度最低。三种翼墙均随着来流风速增大,涵洞内气流输沙能力增强,涵洞由入口处至出口处积沙均逐次减轻,模拟结果与实地的公路涵洞积沙情况类似(图9),C模型输沙能力随来流风速变化最明显,B模型其次。

2.2.3 涵洞积沙随来流方向的变化 图10为12 m·s⁻¹风速时,来流方向与洞口斜交10°、20°时的涵洞积沙分布模拟情况(模拟时间60 s)。由图10可知,随着

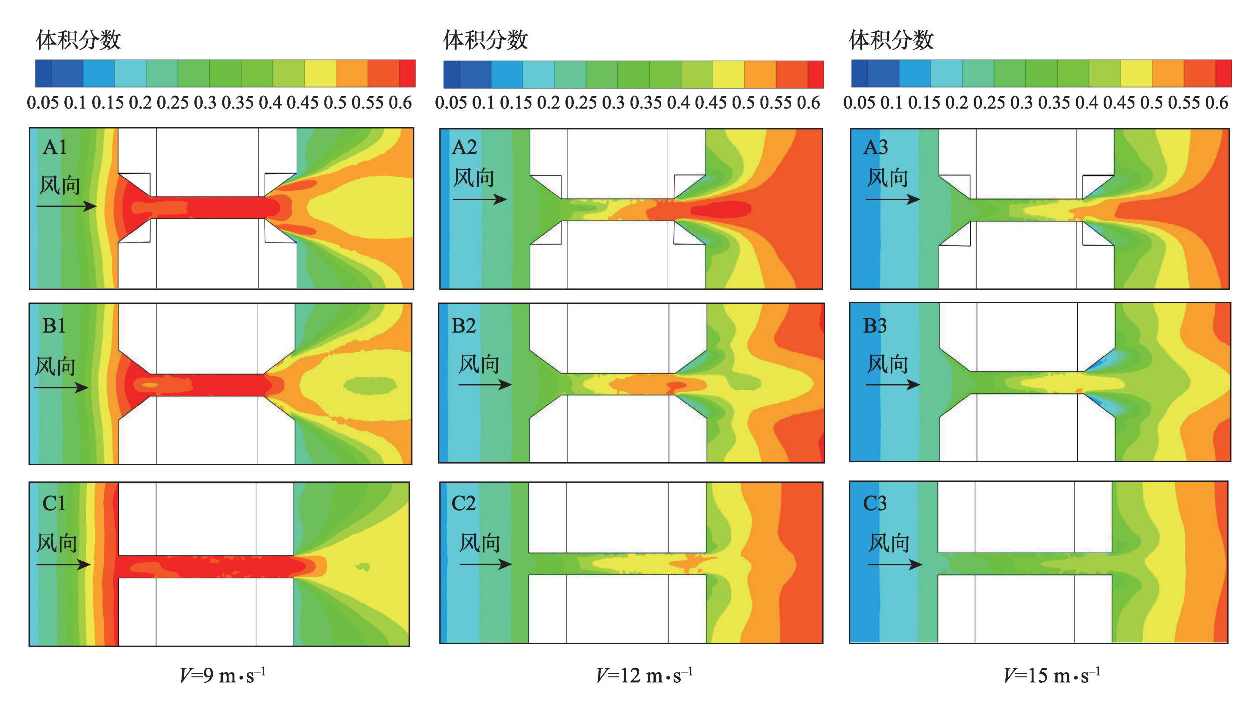


图8 不同风速下三种翼墙类型涵洞内部积沙分布

Fig. 8 Sand accumulation distribution in three types of wing wall culverts under different wind speeds



图9　涵洞内积沙分布

Fig. 9　Sediment distribution in culvert

斜交角度的增加,三种模型涵洞内部积沙形态也发生变化。A模型涵洞内积沙随斜交角度增大,洞内积沙程度增加,当斜交角度为20°时,涵洞内部积沙逐渐加重的同时并有堵塞涵洞入口的趋势;B模型涵洞与风向斜交角度为10°时,洞内及尾部积沙与背风侧积沙开始相连,风向斜角从10°增大至20°时,洞内积沙程度明显减少;C模型风向斜角为10°时,洞内积沙尾部积沙沿洞壁两侧分布,风向斜角为20°时,出口处两侧积沙开始向中间堆积,洞尾积沙程度增大。总体上来看,涵洞积沙受来流风向斜交角度影响明显,A、C模型受风向斜交角度的增加,洞内积沙程度增大,而B模型洞内积沙程度则有所减轻。

3　讨　论

以上涵洞风沙流数值模拟表明,三种翼墙类型的涵洞内流场结构有明显差异,其主要原因在于三种翼墙结构对涵洞入口处气流流向和流速产生了不同扰动,A、B模型翼墙斜交于来流方向,使得气流能在洞口前聚集,并受涵台分流作用明显,使得气流进入涵洞后在洞内顶部和底部产生了明显的分层现象;C模型翼墙平行于来流方向,对入口气流流向扰动较低,入口处气流动能损失低,导致其涵洞内流速均高于A、B模型。

为量化不同翼墙类型对风沙流的输导能力,以12 m·s^{-1}风速,风向斜交角度0°为例,利用公式(11)对三种翼墙类型下涵洞的输导能力进行计算,并对不同时刻下涵洞内部计算体积分数V进行统计监测,其结果如图11所示。

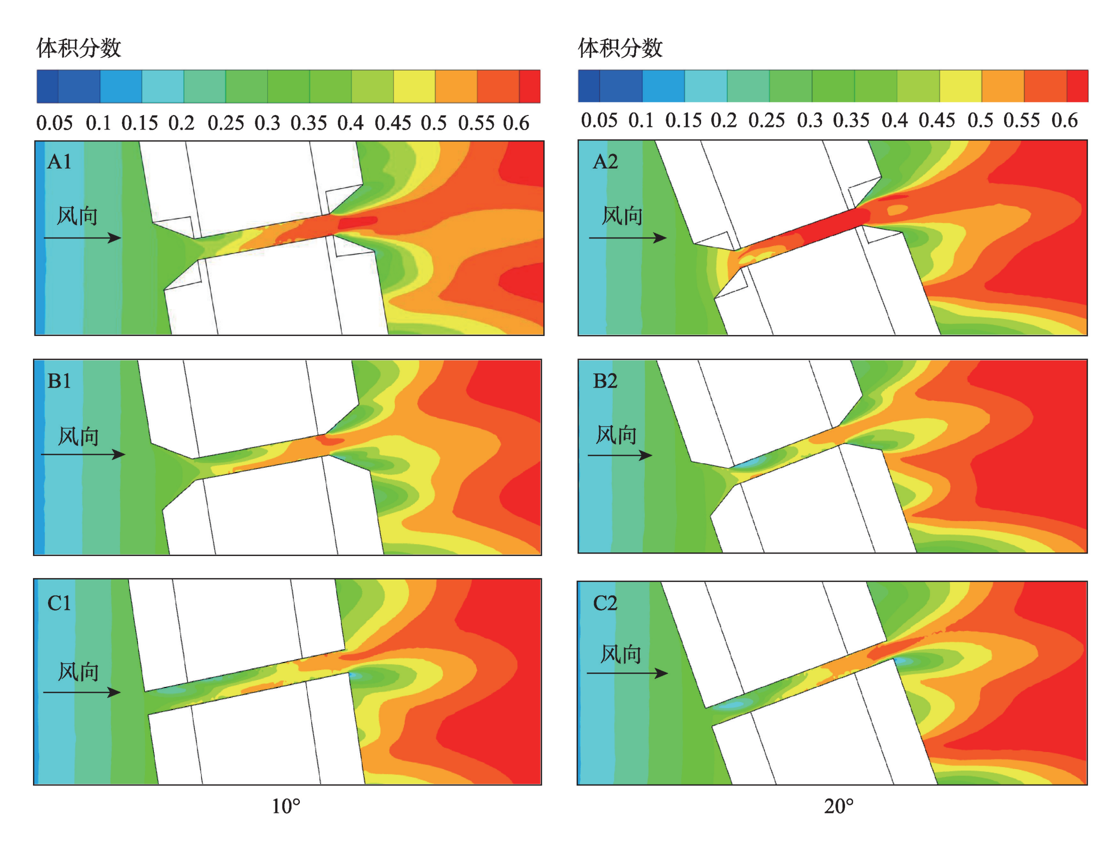


图10　不同斜交风角度下三种翼墙涵洞内外积沙分布

Fig. 10　Sand accumulation distribution inside and outside three kinds of wing wall culvert under different oblique wind angles

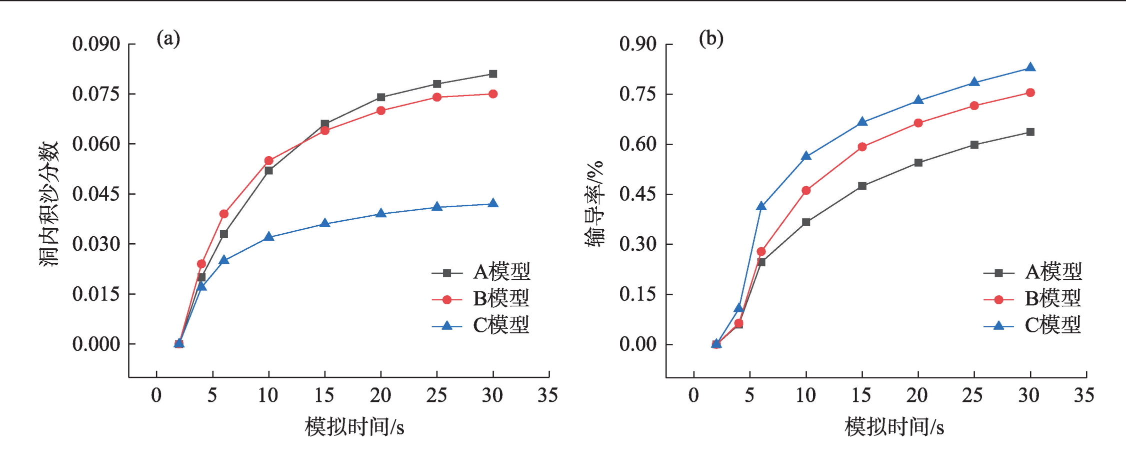


图11 三种翼墙内部积沙及输导率

Fig. 11 Sand accumulation and transport in three wing walls

$$Q=\frac{\sum_{t}^{T}m_{1t}}{\sum_{t}^{T}m_{2t}} \tag{11}$$

式中：Q为涵洞的输导率；m_{1t}为涵洞入口处通过的沙相体积；m_{2t}为涵洞出口处通过的沙相体积；t为计算时间；T为计算总时长。

由图11可知，不同翼墙类型涵洞内部风沙流流量差距较大，其输导能力也存在差异。随模拟时间推移，A、B、C三种翼墙涵洞内部风沙流体积分数分别为0.081、0.075、0.042。其中在15 s前，A模型洞内积沙要低于B模型，原因在于A模型涵洞入口锥坡对来流风沙有一定阻碍作用，减少了前期进入涵洞内部的风沙流浓度；另一方面由计算得出的涵洞输沙效应可以看出，涵洞输沙能力随模拟时间推移，其输沙能力逐渐提高并逐渐趋于稳定，最终模拟结果A、B、C三种翼墙输导率分别为63.64%、75.49%、82.87%，进一步验证了翼墙结构对来流风沙输移具有重要影响。

以往的研究中虽未涉及翼墙结构对来流风沙的影响，但均探讨了涵洞积沙过程中翼墙对入口积沙的导流作用[17-20]，本文通过对不同涵洞翼墙类型的研究发现，翼墙类型不同对道路涵洞积沙的响应规律存在明显差别。在相同开口角度下，A、B模型在洞内风速及输导率方面有较大差异，但洞内体积分数差异相对较少，原因在于两者的翼墙都对风沙流具有汇聚导流的能力，加剧了洞内沙相体积的积累，又因为A模型翼墙更容易对来流风速产生阻碍，导致洞内流速要低于B模型，因此，洞内积沙量比B模型要高，更容易发生积沙堵塞现象。通过比较B、C模型可以发现，翼墙开口角度的减小可以增大洞内流速，同时减弱风沙流的汇入，从而使得涵洞输导能力增强，洞内积沙减少。因此，建议道路涵洞修建时，需根据弱丰水期的导流需求进行设计，涵洞导流需求不强，可采用C模型，若导流需求很强，应避免使用A模型，尽量采用B模型。在实际道路施工中，涵洞翼墙的导流作用往往是必要的，因而风沙区涵洞结构设计如何兼顾导流及输导作用是今后研究的重点。

风向对涵洞积沙具有重要影响，相关研究认为，随着风向夹角的变大，来流风沙容易在涵洞入口堆积并随洞内加速气流带入洞内，从而加重涵洞内部积沙[18-19]，但有研究则表明，来流斜交角度的增加，来流沙粒主要沉积在道路路基两侧，同时减少了流入涵洞的风沙流浓度，从而使得洞腔内积沙减少[20]。出现上述研究结果的差异的原因主要在于涵洞模型的尺寸及构造存在一定区别，因此，后续如何就涵洞对风沙流响应的关键特征参数进行量化建模对接下来探究涵洞风沙流输移影响具有重要意义。通过本文研究中发现，不同翼墙类型内部积沙规律随着风向角度变化存在较大区别，随风向角度的增加，A模型涵洞内部积沙逐渐加重并有堵塞洞口的趋势，B、C模型涵洞内部积沙则会分布于洞壁两侧并向尾部延伸，其中B模型则洞内积沙随斜交角度增大有所减少，而C模型积沙则有所增加。因此，在涵洞施工中，采用A、C模型时要避免与来流主方向成较大斜交角度，采用B模型翼墙时可适当增加斜交角度，有利于减轻洞内积沙。

4 结 论

对三种翼墙涵洞的风沙流进行数值模拟，分析

了涵洞内外流场结构、积沙过程及其随风速和来流夹角积沙变化，主要得到以下结论：

（1）翼墙通过对涵洞入口风速扰动而影响涵洞内部流场结构和积沙状况。洞内A、B模型底部气流波动指数呈下降趋势，且A模型下降幅度大于B模型，C模型气流波动指数则处于上升趋势。从涵洞进出口截面风速可以得出，A、B模型翼墙有较大汇流能力。三种翼墙出口中心风速均略小于入口风速，A、B模型出口风速向中心减弱，使得出口处更容易产生积沙。

（2）涵洞具有一定的输沙功能，但同时洞内外也伴有积沙过程。12 m·s^{-1}风速下A模型先在入口锥坡处及涵洞内部形成积沙，随后积沙逐渐扩展至涵洞出口处，形成大面积积沙；B模型则先在涵洞内部形成积沙，随后积沙向涵洞出口处扩展，扩展程度要小于A模型；C模型积沙先在路基两侧边坡坡脚堆积，随后扩展到路面，洞内积沙较少。随着风速增大，从涵洞入口到出口，积沙依次减轻。C模型输沙能力对风速响应明显，B模型其次，A模型最弱。

（3）来流方向对涵洞积沙也有影响。当主风向与洞口成10°斜交风时，A模型洞内积沙加重，B、C模型涵洞内部积沙则会分布于洞壁两侧并向尾部延伸。当斜交风向增大为20°时，A模型涵洞内部积沙逐渐加重的同时并有堵塞涵洞入口的趋势，C模型洞内积沙则主要沿涵洞出口向尾部堆积，而B模型洞内积沙程度则有所减弱。因此，在涵洞翼墙施工中，当主风向与洞口斜交角度过大时可采用B模型，有利于减轻洞内积沙。

（4）翼墙对涵洞内部积沙及输沙能力有较大影响。C模型和B模型输沙能力较强，分别为82.87%、75.49%，A模型输沙能力较弱仅为63.64%。就洞内积沙程度而言，C模型涵洞内积沙体积分数最低，仅为0.042，其次为B模型0.075，A模型最高为0.082。若丰水期涵洞导流需求不强，可采用C模型翼墙；若导流需求很强，则应采用B模型翼墙，同时应注重翼墙开口角度设计，避免涵洞在枯水期间对风沙流的汇聚，造成涵洞积沙堵塞。

参考文献(References)：

[1] 昝国盛, 王翠萍, 李峰, 等. 第六次全国荒漠化和沙化调查主要结果及分析[J]. 林业资源管理, 2023(1): 1-7. [Zan Guosheng, Wang Cuiping, Li Feng, et al. Main results and analysis of the sixth national survey on desertification and desertification[J]. Forest Resources Management, 2023(1): 1-7.]

[2] 赵松乔. 西北干旱区主要自然灾害的形成、分布和减灾措施[J]. 中国沙漠, 1991, 11(4): 7-14. [Zhao Songqiao. Formation, distribution and mitigation measures of main natural disasters in arid areas of Northwest China[J]. Journal of Desert Research, 1991, 11(4): 7-14.]

[3] 史培军, 严平, 袁艺. 中国北方风沙活动的驱动力分析[J]. 第四纪研究, 2001, 21(1): 41-47. [Shi Peijun, Yan Ping, Yuan Yi. Analysis of driving forces of aeolian sand activity in North China[J]. Quaternary Sciences, 2001, 21(1): 41-47.]

[4] Mao X, Wang F, Wang B. Nationwide desert highway assessment: A case study in China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2011, 8(7): 2734-2746.

[5] 杨倩. 我国西部地区公路建设投资与经济增长之关系研究[D]. 北京: 中央民族大学, 2012. [Yang Qian. Study on the Relationship between Highway Construction Investment and Economic Growth in Western China[D]. Beijing: Central Mingzu University, 2012.]

[6] 安元锋. 沙漠公路路基路面积沙规律与输沙路基结构研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2024. [An Yuanfeng. Study on Sediment Area Rule and Sediment Transport Subgrade Structure of Desert Highway[D]. Shihezi: Shihezi University, 2024.]

[7] 惠迎新, 刘俊绿, 许鹏, 等. 基于形态仿生理念的沙漠路基边坡结构设计与研究[J]. 干旱区资源与环境, 2024, 38(4): 95-104. [Hui Yingxin, Liu Junlu, Xu Peng, et al. Structural design and research of desert roadbed slope based on morphological bionic concept[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2024, 38(4): 95-104.]

[8] 鱼燕萍, 肖建华, 屈建军, 等. 两种典型高等级公路路基断面风沙过程的风洞模拟[J]. 中国沙漠, 2019, 39(1): 68-79. [Yu Yanping, Xiao Jianhua, Qu Jianjun, et al. Wind tunnel simulation of wind-sand process on two typical highway subgrade sections[J]. Journal of Desert Research, 2019, 39(1): 68-79.]

[9] 鱼燕萍, 肖建华, 屈建军, 等. 不同坡角公路路基流场的风洞实验[J]. 中国沙漠, 2018, 38(3): 464-472. [Yu Yanping, Xiao Jianhua, Qu Jianjun, et al. Wind tunnel experiment on subgrade flow field of highway with different slope angles[J]. Journal of Desert Research, 2018, 38(3): 464-472.]

[10] 党兵, 符亚儒, 施智宝, 等. 基于缓解沙漠高速公路风沙危害的路基参数优化——以榆靖高速公路为例[J]. 中国沙漠, 2007, 27(6): 946-954. [Dang Bing , Fu Yaru, Shi Zhibao, et al. Optimization of subgrade parameters based on mitigation of sand damage on desert expressway: A case study of Yujing Expressway[J]. Journal of Desert Research, 2007, 27(6): 946-954.]

[11] Wang C, Li S, Li Z, et al. Effects of windblown sand damage on desert highway guardrails[J]. Natural Hazards, 2020, 103: 283-298.

[12] Gao L, Cheng J, Wang H, et al. Effects of different types of guardrails on sand transportation of desert highway pavement[J]. Journal

of Arid Land, 2022, 14(9): 993-1008.

[13] An Y, Cheng J, Ding L, et al. Evolution law of wind-sand flow field of multi-row reed sand barriers and optimal spacing[J]. Natural Hazards, 2023, 120(1): 197-218.

[14] 席成, 左合君, 王海兵, 等. 高立式尼龙网沙障防风阻沙特征及其合理配置[J]. 干旱区研究, 2021, 38(3): 882-891. [Xi Cheng, Zuo Hejun, Wang Haibing, et al. Characteristics of vertical nylon mesh sand barrier and its reasonable configuration[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(3): 882-891.]

[15] 赵立岩. 混凝土圆涵洞的病害分析及预防[J]. 公路, 2001(11): 60-62. [Zhao Liyan. Disease analysis and prevention of concrete round Culvert[J]. Highway, 2001(11): 60-62.]

[16] Bruno L, Horvat M, Raffaele L. Windblown sand along railway infrastructures: A review of challenges and mitigation measures[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2018, 177: 340-365.

[17] 李凯崇, 石龙, 张芳, 等. 风沙流与铁路涵洞的响应规律研究[J]. 铁道工程学报, 2015, 32(11): 14-17, 48. [Li Kaichong, Shi Long, Zhang Fang, et al. Study on response law of wind-blown sand flow and railway culvert [J]. Journal of Railway Engineering, 2015, 32 (11): 14-17, 48.]

[18] 石龙, 蒋富强, 李凯崇, 等. 风沙流对铁路涵洞响应规律的三维仿真分析[J]. 铁道工程学报, 2016, 33(9): 14-18. [Shi Long, Jiang Fuqiang, Li Kaichong, et al. Three-dimensional Simulation analysis of response law of wind-blown sand flow to railway culvert [J]. Journal of Railway Engineering, 2016, 33(9): 14-18.]

[19] 智凌岩, 程建军, 王连, 等. 沙漠地区道路涵洞周围流场规律及积沙特征研究[J]. 铁道标准设计, 2018, 62(4): 62-67. [Zhi Lingyan, Cheng Jianjun, Wang Lian, et al. Study on flow field and sediment accumulation characteristics around road culvert in desert area [J]. Standard Railway Design, 2018, 62(4): 62-67.]

[20] 崔晓宁. 格库铁路涵洞沙害及新型阻沙堤网阻沙机理研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2020. [Cui Xiaoning. Study on Sand Damage in Geku Railway Culvert and Sand Blocking Mechanism of New Type of Sand Barrier Net[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2020.]

[21] 杨晓明, 贾海锋, 周有禄. 青藏铁路涵洞周围沙害形成机理的数值分析[J]. 铁道建筑, 2021, 61(9): 109-111, 133. [Yang Xiaoming, Jia Haifeng, Zhou Youlu. Numerical analysis of sand damage formation mechanism around culvert in Qinghai-Tibet Railway[J]. Railway Construction, 2021, 61(9): 109-111, 133.]

[22] 武生智, 任春勇. 基于欧拉双流体模型的风沙运动模拟[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2012, 48(1): 104-107, 112. [Wu Shengzhi, Ren Chunyong. Simulation of sandstorm motion based on Euler two-fluid model[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Science Edition), 2012, 48(1): 104-107, 112.]

[23] Xu B, Zhang J, Huang N, et al. Characteristics of turbulent aeolian sand movement over straw checkerboard barriers and formation mechanisms of their internal erosion form[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2018, 123(13): 6907-6919.

[24] Zhang C, Huang N, Dun H C. Experimental study on sand/bed collision over the Gobi surface[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2022, 127(4): e2021JD035766.

[25] 张展, 张小安, 徐建刚, 等. 吸沙式挡沙墙设计及防护效益分析[J]. 干旱区资源与环境, 2024, 38(6): 137-147. [Zhang Zhan, Zhang Xiao'an, Xu Jiangang, et al. Analysis on the design and protection benefit of sand suction retaining wall[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2024, 38(6): 137-147.]

[26] 张兴鑫, 张凯, 史博源, 等. 流动沙丘区公路路基风沙流场数值模拟及路面沙害形成机制[J]. 干旱区研究, 2021, 38(4): 1184-1191. [Zhang Xingxin, Zhang Kai, Shi Boyuan, et al. Numerical simulation of wind-sand flow field and formation mechanism of road surface sand damage in mobile dune region[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(4): 1184-1191.]

[27] 辛林桂, 程建军, 王连, 等. 沙漠地区三种风沙侧向输导工程的数值模拟[J]. 水土保持通报, 2018, 38(4): 195-201. [Xin Lingui, Ceng Jianjun, Wang Lian, et al. Numerical simulation of three kinds of wind-blown sand lateral transport projects in desert area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(4): 195-201.]

[28] 杨兴华, 马明杰, 周成龙, 等. 不同起沙阈值判定方案在塔克拉玛干沙漠的适用性对比研究[J]. 干旱区研究, 2022, 39(4): 1006-1016. [Yang Xinghua, Ma Mingjie, Zhou Chenglong, et al. Comparative study on the applicability of different sediment threshold determination schemes in the Taklimakan Desert[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(4): 1006-1016.]

[29] 谢莉, 郑晓静. 风沙流中沙粒起跳初速度分布的探讨[J]. 中国沙漠, 2003, 23(6): 34-38. [Xie Li, Zheng Xiaojing. Study on the initial take-off velocity distribution of sand particles in wind-blown sand flow[J]. Journal of Desert Research, 2003, 23(6): 34-38.]

[30] 徐建刚, 黄宁, 张洁, 等. 铁路路基边坡结构对风沙流输运规律影响的数值模拟研究[J].干旱区资源与环境, 2023, 37(8): 89-96. [Xu Jiangang, Huang Ning, Zhang Jie, et al. Numerical simulation of the influence of railway embankment slope structure on the transport law of wind-driven sand flow[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2023, 37(8): 89-96.]

Numerical simulation of influence of wing wall type of expressway culvert on transport of wind-blown sand flow in wind-blown sand area

XIA Tian[1,2,3], LI Shengyu[1,2,3], ZHANG Jing[1,2,4,5], CUI Kejun[1,2,3]

(1. Key Laboratory of Ecological Safety and Sustainable Development in Arid Lands, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, National Engineering Technology Research Center for Desert-Oasis Ecological Construction, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Mosuowan Desert Research Station, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Shihezi 832000, Xinjiang, China; 4. Xinjiang Transportation Research Institute Co., Ltd., Urumqi 830000, Xinjiang, China; 5. Key Laboratory of Highway Engineering Technology and Transportation Industry in Arid Desert Region, Urumqi 830000, Xinjiang, China)

Abstract: A culvert is designed to manage water flow beneath an embankment. However, road culverts often encounter issues with sand accumulation, which disrupts flood flow and jeopardizes road safety. To identify wing wall types that reduce sediment accumulation in culverts, three models were developed—one-sided wall, eight-sided wall, and straight wall. Numerical simulations were conducted to analyze the characteristics of the outflow field and the sediment accumulation processes for each model. The results indicate the following: (1) The structure and velocity of the flow field in the culvert vary significantly based on the wing wall type. In cavities A and B, airflow primarily adheres to the upper wall of the culvert, while in cavity C, the airflow is accelerated. Overall, the velocity in the cavities is ranked as C>B>A. (2) The process of sediment accumulation in the culvert varies significantly based on the wing wall type. Wing walla A and B effectively guide airflow, leading to a high concentration of wind-sand flow within the culvert, making sand accumulation more likely. Conversely, wall C exhibits a weaker diversion ability, accumulating sand primarily at the culvert mouth and shoulder. As incoming wind speed increased, the sand transport capacity of the three culverts improved, with wall C showing the most significant increase, followed by wall B and wall A showing the least. (3) Wind direction also affects sediment accumulation in the culvert. As the oblique angle increased, sediment accumulation in cavities A and C also increased, while sediment accumulation in cavity B decreased. (4) The transport efficiency varies among different wing walls, with sand accumulation in the cavities ranked as A>B>C, while transport efficiency is ranked as C>B>A. Overall, wing wall C was most effective at reducing sand accumulation in the culvert.

Keywords: road culvert; flow field distribution; wind-drift sand; numerical simulation